



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Terningapparatet

et middel til bedre jordforståelse

Ibsen, Lars Bo; Steenfelt, J. S.

Published in:

Proceedings of the XII Nordic Geotechnical Conference : NGM-96

Publication date:
1996

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Ibsen, L. B., & Steenfelt, J. S. (1996). Terningapparatet: et middel til bedre jordforståelse. I S. Erlingsson, & H. Sigursteinsson (red.), *Proceedings of the XII Nordic Geotechnical Conference : NGM-96: Reykjavik, 26-28 juni, 1996* (Bind 1, s. 111-122). Icelandic Geotechnical Society.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

NGM-96 • VOLUME 1 • ARTIKLER

XII Nordiska Geoteknikermötet

REYKJAVÍK 26.-28. JUNI 1996



JARÐTÆKNIFÉLAG ÍSLANDS
ICELANDIC GEOTECHNICAL SOCIETY

Geotekn.
NGM-96 • REYKJAVÍK 26.-28. JUNE 1996
VOLUME 1 • TECHNICAL PAPERS

XII Nordic Geotechnical Conference

Interplay between Geotechnics and Environment



Editors:

Sigurður Erlingsson • Haraldur Sigursteinsson

JARÐTÆKNIFÉLAG ÍSLANDS
ICELANDIC GEOTECHNICAL SOCIETY

Terningapparatet - et middel til bedre jordforståelse

Lars Bo Ibsen

Aalborg Universitet, Danmark

Jørgen S. Steenfelt

Aalborg Universitet, Danmark

SYNOPSIS: På Aalborg Universitet blev der i 70'erne udviklet et terningapparat der kan udføre forsøg på uforstyrrede prøver af materialer spændende fra blødt, marint ler til stift, dansk moræneler. Endvidere kan der udføres forsøg med udlejrede sandprøver. Apparatet var absolut state-of-the-art, men pga datidens elektronik var det ikke muligt at leve op til de høje krav til automatisk styring, der ville tillade kommerciel brug af apparatet. Terningapparatet er i 1995 blevet renoveret og forsynet med moderne elektronik, så det nu er muligt at køre forsøg af den ønskede standard.

I artiklen redegøres der for apparatets opbygning og funktion samt de forsøgsmæssige muligheder for belysning af en jordprøves anisotrope spændings- og tøjningstilstande. Apparatets potentiale demonstreres ved hjælp af forsøgsresultater fra en marin ler.

Artiklen illustrerer forskellen mellem forsøgsresultater opnået på samme jordart i det normale danske triaksialapparat og terningapparatet, og der gives anbefalinger mht problemstillinger, hvor forsøg i terningapparatet må foretrækkes.

INDLEDNING

Slutningen af dette århundrede bliver spændende for de geotekniske laboratorier. Det skyldes bl.a. at indførelsen af en fælles europæisk funderingsnorm stiller mere stringente krav til kvalitet og eftervisning af dimensioneringsgrundlaget.

Det vil i fremtiden blive sværere blot at bruge erfaringsværdier for jordparametrene, idet der nu stilles krav om verificering af de anvendte værdier. Samtidig er udviklingen af numeriske værktøjer eksploderet. Det er muligt at gennemføre selv avancerede tre dimensionale finite element beregninger på en PC.

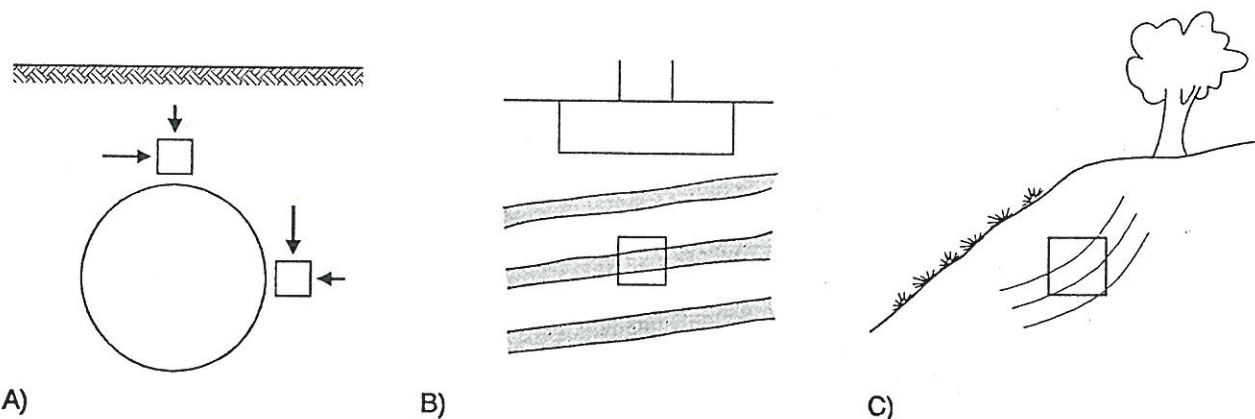


Fig. 1. Anisotropi i jord induceret på grund af: (a) Konstruktionsaktivitet; (b) Materialer; (c) Spændings-tøjningstilstand

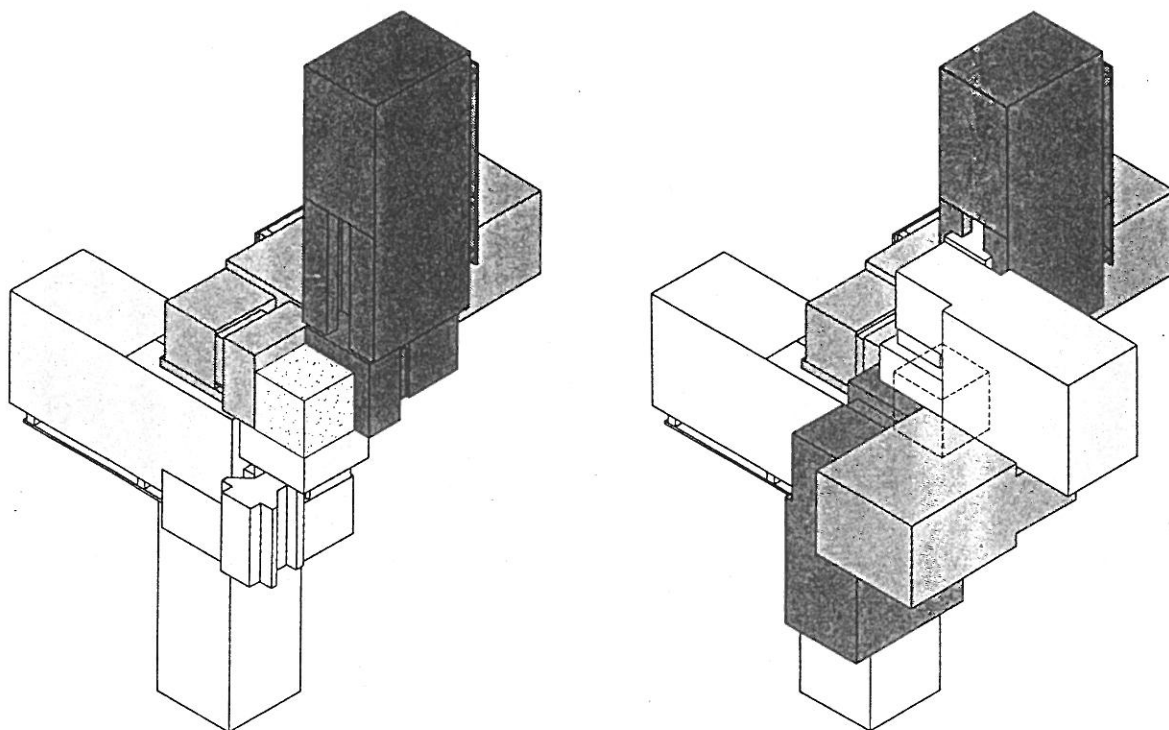


Fig. 2. Terningapparatet ved Aalborg Universitet

Derfor er der stigende krav til nøjagtigheden og kompleksiteten af de konstitutive modeller, samt af jordparametre, der danner baggrund for den numeriske modellering.

I dag er hovedparten af de konstitutive modeller, der anvendes af kommercielle finite element programmer som f.eks. Plaxis og ABAQUS, udviklet på baggrund af laboratorie forsøg der ikke beskriver essentielle fænomener / tilstande ved jorden. Modellerne er i høj grad udviklet på baggrund af triaksialforsøg udført i overensstemmelse med Berre et al. (1995), dvs. med prøver med højde/diameter forhold 2 og ru endeflader. Denne forsøgstype evner hverken at beskrive det korrekte spændings - tøjnings forløb eller den korrekte udvikling af de effektive spændinger under udrænedede forhold i friktionsjord eller kohæsionsjord hvor $OCR > 1$, se Ibsen (1994), Jacobsen (1981), Lade (1982).

Triaksialapparatet er i sin virkemåde aksialsymmetrisk og kan derfor strengt taget kun anvendes i de få tilfælde, hvor spændingstilstandene er aksialsymmetriske, som eksempelvis i midterlinien under et cirkulært fundament. I triaksialapparatet udføres forsøgene med blan-

dede grænsebetingelser, idet prøvens endeflader, der belastes gennem et stift trykhoved er deformationskontrollerede, mens prøvens membranbelagte sider er spændingskontrollerede. Man kan derfor kun kontrollere / måle den gennemsnitlige vandrette spænding og tøjning. Konventionelle triaksialforsøg evner derfor ikke at kvantificere den anisotropi, vi ved er uomgængelig i virkelig jord, se figur 1.

For at kunne håndtere, kvantificere og vurdere anisotropiens indflydelse på jordens opførsel må vi benytte os af forsøgstyper der tillader generelle spændings- / tøjningstilstande. En af mulighederne er *Terningapparatet* - også benævnt som det *Kubiske Triaksialapparat* eller *The True Triaksial Apparatus* - idet der her kan skabes "ægte" triaksiale spændings og tøjningstilstande.

2. TERNINGAPPARATET

Ved Aalborg Universitet blev der i perioden 1975 til 1981 udviklet et terningapparat af Moust Jacobsen, se figur 2. Apparatets mekaniske virkemåde er den dag i dag genial og e-

nestående. Apparatet kom desværre aldrig til at fungere tilfredsstillende, idet datidens elektronik ikke kunne leve op til de høje krav, der var til den automatiske kontrol af det komplicerede apparat. Apparatet er i 1995 blevet renoveret og forsynet med moderne elektronik, så det nu er mulig at køre forsøg af den ønskede standard. Endvidere er apparatet modificeret så der nu kan udføres forsøg på kubiske prøver med sidelængden 50 eller 70 mm.

2.1 Opbygning

Apparatet består af 6 bevægelige drivblokke, der er monteret så de danner en tredimensional ramme hvorpå trykhovederne er monteret, se figur 2. Trykhovederne er flydende, dvs bevægelsen er kontrolleret af en drivblok i en retning, men fri i de to andre. Deformationen af den kubiske prøve foregår ved, at trykhovederne glider på hinanden i stedet for at blive presset ind i hinanden. Herved kan de stive trykhoveder glide relativt i forhold til hinanden uden at nogle sprækker åbnes, se figur 3. Apparatet er konstrueret, så den kubiske prøve kan deformeres ± 20 mm i de tre belastningsretninger. Ved en nøjere betragtning af trykhovedernes bevægelsesmåde indses, at i eet hjørne på hvert trykhoved finder der ingen glidning sted. Her kan dræningssystemet / poretryksmålaren placeres uden at ødelægge apparatets virkemåde, se figur 4.

For at undgå apparatinducerede målefejl, er transducerne, til måling af hovedspændingerne σ og poretryk u , indbygget i de stive trykho-

veder, og deformationen af det enkelte trykhoved måles direkte på trykhovedet. De to flytningsmålere i hver belastningsretning er koblet, så de måler den relative flytning af to modstående trykhoveder.

For at kunne antage, at det er hovedspændinger, der måles, må det sikres at trykhovederne ikke påføre prøven forskydningspændinger. Dette gøres ved at anvende glatte trykhoveder. Dvs polerede trykflader, som påføres en sandwich af siliconefedt og tynde latex membraner. I praksis indkapsles prøven i en latexmembran, se figur 6, hvorefter den placeres direkte på de indsmurte trykhoveder.

Belastningen, der påføres vha. 3 DC motorer, er servostyret, og hver retning kan enten være spændings-, tøjnings- eller poretrykskontrolleret. Endvidere kan hver retning deformeres med en konstant hastighed, eller belastningen kan påføres som en statisk eller cyklisk varierende last.

2.2 Styre og målenøjagtighed

Det normale forsøgs-setup består af:

- tre trykhoveder med 5000 N belastningsceller, en i hver belastningsretning,
- 6 stk ± 10 mm flytnings- transducere, der er koblete, så de måler differensflytningen af trykhovederne i samme retning,
- samt en 1000 kPa poretrykstransducer monteret ved nedre trykhoved.

Forsøget styres, og transducerne aflæses vha. en digital MGC- forstærker fra Hottinger Baldwin Messtechnik.

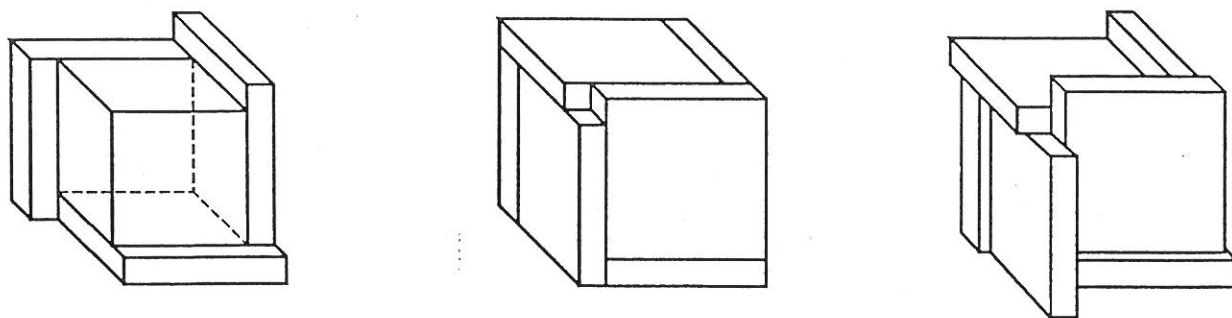


Fig. 3. Principskitse af trykhovedernes bevægelse

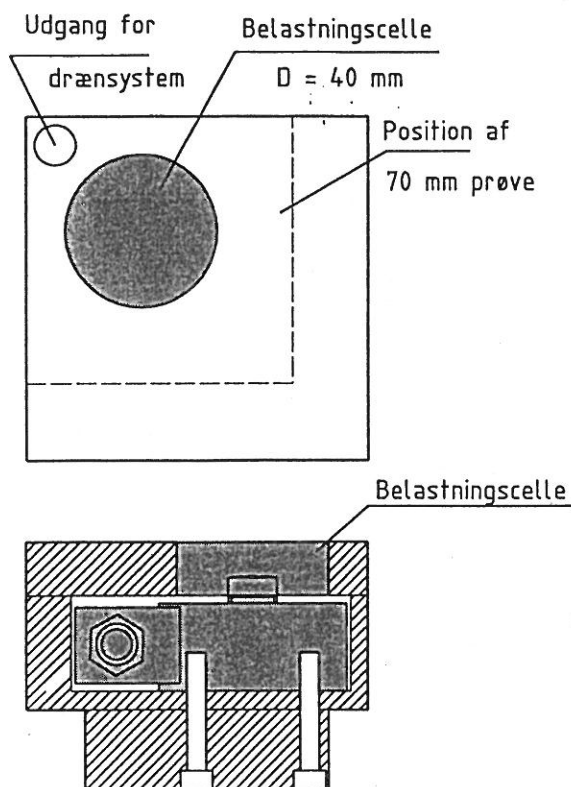


Fig. 4. Plan og tværsnit af trykhoved med belastningscelle og udgang til dræn og poretryksmålesystem

Det digitale forstærkersystem giver den fordel, at transducerens måleområde samt målenøjagtighed kan ændres under forsøget svarende til kravene ved de enkelte faser i forsøget.

F.eks. kræver den arealkonstante konsolidering, $\Delta \varepsilon_2 = \Delta \varepsilon_3 = 0$, at trykhovederne ikke bevæger sig for at måle korrekte værdier af K_0 , mens forsøgets brudfase kræver store deformationer. Dvs, at der i konsolideringsfasen simuleres der digitalt et måleområde på ± 1 mm, svarende til en målenøjagtighed på $0,1 \mu\text{m}$. I brudfasen benyttes et måleområde på ± 10 mm svarende til en målenøjagtighed på $1 \mu\text{m}$.

Den totale kraft måles vha. en belastningscelle bestående af en cirkulær trykplade, der er påmonteret en krafttransducer. Belastningscellen er indbygget i det massive trykhoved så den flugter med trykhovedets trykplade, se figur 4.

Belastningscellen er en 5000 N lastcelle, der digitalt kan ændre måleområde i intervallet 300 til 5000 N, svarende til en målenøjagtighed på

0,03 til 0,5 N. Størrelsen af trykpladen kan varieres. Ved forsøg med 50 mm prøver er diameteren $D = 20$ mm svarende til en målenøjagtighed i intervallet 0,1 til 1,5 kPa. Ved 70 mm prøver er $D = 40$ mm svarende til en målenøjagtighed i intervallet 0,02 til 0,4 kPa.

I figur 5 ses et arealkonstant konsoliderings-trin med $\sigma'_1 = 120$ kPa.

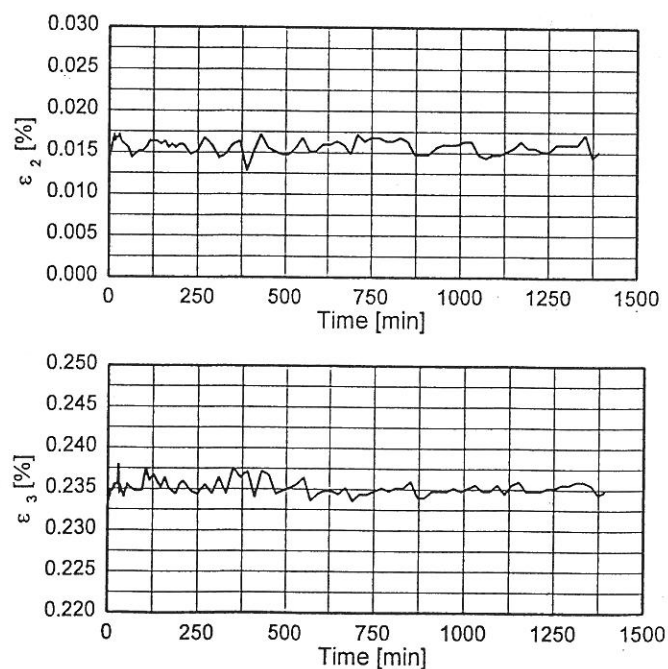
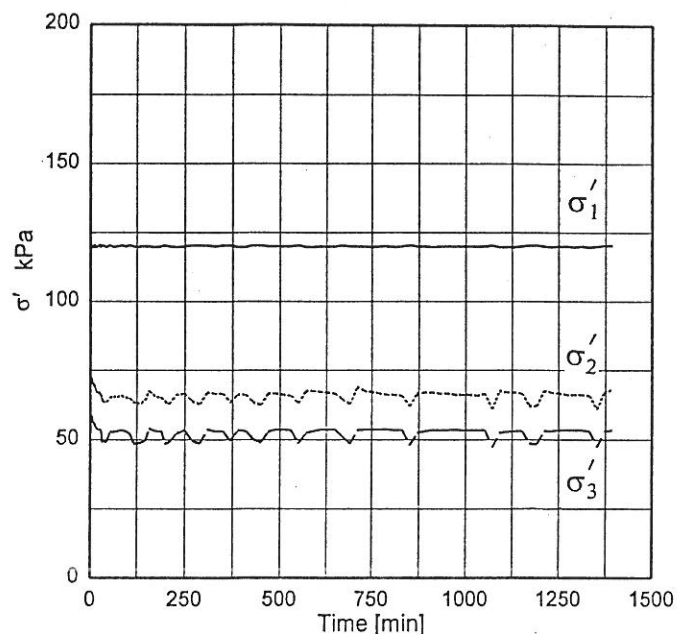
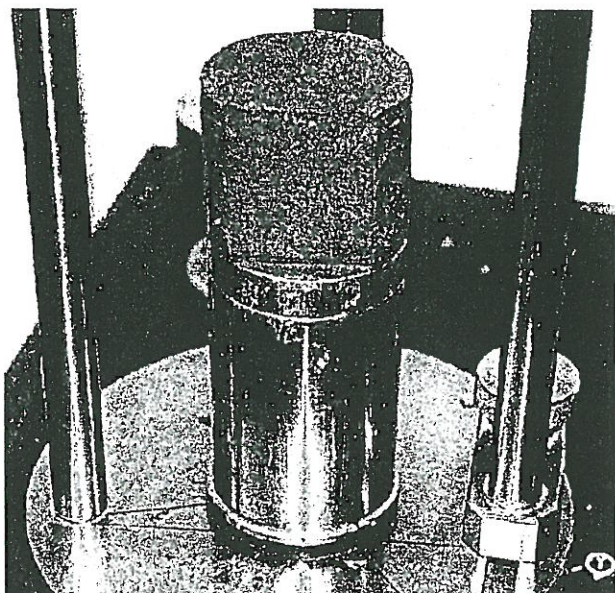
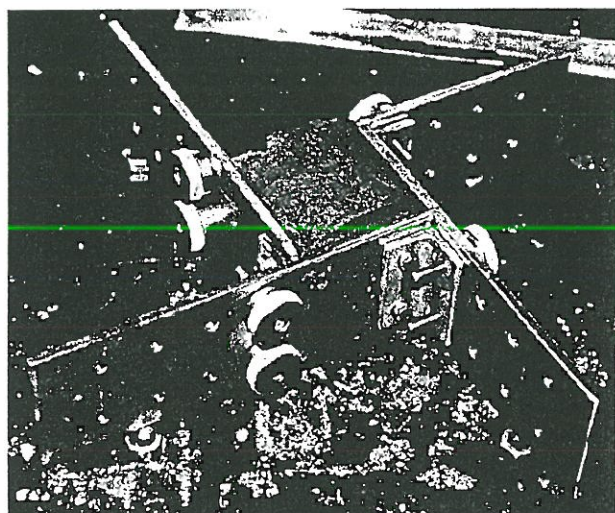


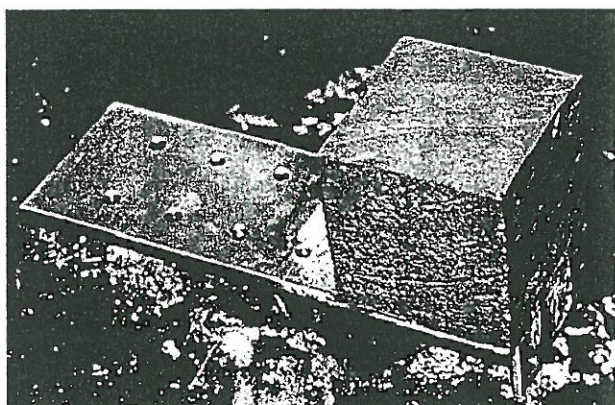
Fig. 5. Målenøjagtighed ved arealkonstant konsolidering med $\sigma'_1 = 120$ kPa



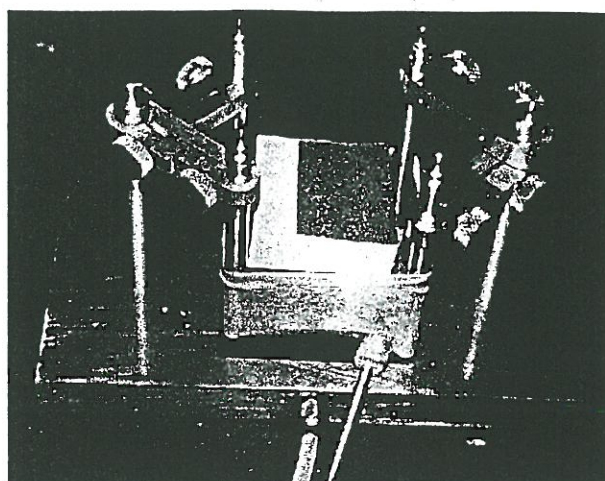
a) Prøve afskåret ved den foreskrevne vinkel. Første flade svarer til 3-retningen i apparatet.



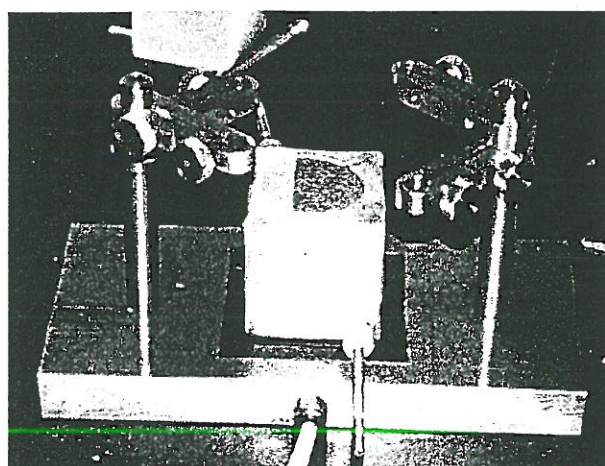
b) Prøven tildannes endeligt vha. en form. Efter tildannelse af den enkelte side afmonteres formen og prøven roteres, hvorefter næste side kan afrettes.



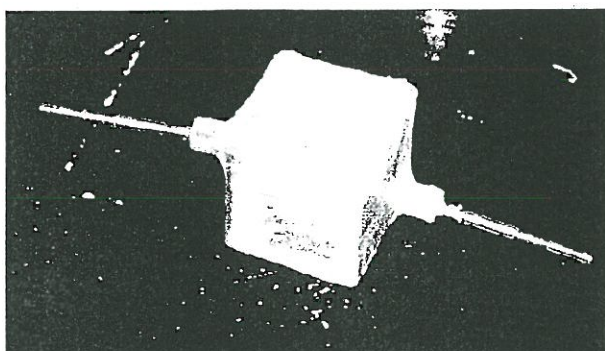
c) Prøven er tildannet og drænsystem bestående af filterpapir kan påsættes.



d) Prøven placeres forsigtigt i membranen.



e) Prøve indkapslet af membran, og kun toppen mangler at blive forseglet.



f) Prøven er fuldstændig indkapslet og klar til forsøg.

Fig. 6. Illustration af de forskellige faser i prøvetildannelse og placering af prøve og filtersten / drænsystem i den støbte membran

Med en målenøjagtighed på 0,1 kPa på spændingen og 0,1 μm på tøjningen ses det, at servostyringen holder σ'_1 konstant gennem hele belastningstrinnet, og at positionen af trykhovederne holdes konstant med en variation $\delta < \pm 1 \mu\text{m}$.

Det ses endvidere, at selv denne lille variation giver anledning til, at spændingerne σ'_2 og σ'_3 varierer $\pm 2,5$ kPa. Dette indikerer, at for at kunne måle de korrekte spændinger skal belastningscellen være ekstrem stiv. Den valgte tryktransducer sikrer, at deformationen af belastningscellen, ved en belastning på 1000 kPa, er mindre end 6 μm .

2.3 Prøvetildannelse

Prøver kan tildannes fra rørprøver, klumpprøver etc. Procedurene er vist på figur 6 for tildannelse af en kubisk prøve med sidelængde 50 mm ud fra en rørprøve med diameter 72,7 mm.

Tildannelse af 70 mm kubiske prøver kræver rørprøver med mindst 100 mm diameter.

3. EKSEMPEL PÅ ANVENDELSE

3.1 Baggrund

Med Terningapparatet, Mark 1 var geoteknikgruppen ved AAU havnet i en "Catch 22" situation. På grund af mangler ved elektronikken og delvis i det mekaniske system kunne der ikke køres de forsøg, der var nødvendige for at tiltrække kommerciel opmærksomhed. Og da der ikke kunne køres kommercielle forsøg, var der ikke økonomisk basis for en renovering.

Heldigvis "dukkede" der en klient op, der var villig til at tro på vore forsikringer om, at vi kunne ændre apparatet så forsøgene kunne køres på aftalt måde og til aftalt tid.

Med denne "økonomiske sikkerhed" blev en renovering - svarende til Mark "1.5" beskrevet i afsnit 2 - sat i gang.

3.2 Opgave

For en pleistocæn, marin ler ønskede klienten en kvantificering af lerens spændings/tøjnings

anisotropi, idet in situ observationer fra havbunden havde givet stærke indicier for en udpræget anisotropi.

Til undersøgelse af lerens blev der leveret to 72,7 mm diameter prøverør med 0,20 m lange prøver. Da Terningapparatet oprindeligt var designet for 70 mm kubiske prøver, krævede denne prøvestørrelse en ombygning, så 50 mm kubiske prøver kunne benyttes - svarende til en effektiv prøvediameter på 70,7 mm.

Klienten havde selv udført triaksialforsøg svarende til international praksis, dvs cylindriske prøver med $H/D = 2$ og ru trykhoveder. Det aftaltes derfor, at der også blev udført "danske" triaksialforsøg på cylindriske prøver. ($H/D = 1$ og 60 mm diameter, da opskæring af rørene kunne gå et par mm ind i prøven).

Udover at finde K_0 og c_u i aksialsymmetrisk tilstand ville dette give en forhåndskendskab til lerens opførsel samt et bedre sammenligningsgrundlag for vurdering af resultaterne fra Terningapparatet.

3.3 Forhåndsoplysninger om lerens

Forhåndsoplysningerne om de to rørprøver fremgår af tabel 1.

Tabel 1. Oplysninger om lerens

| Egenskab | | Prøve A | Prøve B |
|-----------------------------------|----------------------|----------------|----------------|
| Dybde under havbund | [m] | $\approx 31,3$ | $\approx 25,3$ |
| In situ spænding ¹ | σ'_v [kPa] | 180 | 147 |
| Forbelastning ² | σ'_{pc} [kPa] | 127 | 104 |
| In situ vinge styrke | s_u [kPa] | 28-48 | 24-44 |
| Styrkeforhold triaks ³ | c_u/σ'_{pc} | 0,24 | 0,29 |
| Svelletryk ⁴ | [kPa] | 15 | |
| Plasticitetsindeks | I_p [%] | ≈ 40 | |
| Konsistensindeks | I_c [%] | 0,4-0,5 | |

¹Antaget, idealiseret på basis af borer

²Reviderede borehulsdata under forsøgsprogram

³ $H/D=2$ og ru trykhoveder

⁴Bestemt fra oedometerforsøg

3.3 Forsøgsprogram og procedurer

Efter opskæring af prøverørene blev der tildan-

net seks prøver.

Prøve T1 og T2 blev trimmet til 60 mm diameter med højde 60 mm mens resten blev trimmet som kubiske prøver med sidelængde 50 mm som vist på figur 6. Trimmingsretningen for prøverne var dikteret af klienten baseret på vinkeldrejning relativ til markering på prøverøret.

Triaksialforsøg

De to normale triaksialforsøg blev kørt som $CAU_{u=0}$ forsøg. Dvs trinvis arealkonstant konsolidering, efter isotrop konsolidering for at undgå svelning, efterfulgt af et udrænet forsøg til brud med poretryk $u = 0$.

Det viste sig dog, at svelletrykket var højere end bedømt ved oedometerforsøgene så $p' \geq 25$ kPa blev benyttet i alle forsøg.

Mætningstest ved $p' = 40$ kPa gav $B = \Delta u / \Delta p' = 0,78$, dvs prøverne var ikke vandmættede. Der er derfor kun to muligheder for at få brugbare resultater, $U_{u=0}$ forsøg eller anvendelse af bagtryk. Det første anvendtes i triaksialforsøgene mens bagtryk anvendtes i de kubiske forsøg.

I brudfasen blev der anvendt en konstant tøjningshastighed på $\dot{\epsilon}_1 = 2\% / h$ til $\Delta \epsilon_1 = 18\%$, hvorefter hastigheden blev øget til $\dot{\epsilon}_1 = 12\% / h$ for at kontrollere indflydelsen af forsøgshastigheden på den målte c_u værdi.

Kubiske forsøg

For at sikre en nænsom installation af prøven, med kontakt til trykhovederne i alle tre retninger, blev prøven installeret med trinvis opbygning af p til 10 kPa ved hjælp af spændingsstyring i alle tre retninger, uden dræningsmulighed for prøven.

Herefter blev prøverne konsolideret isotropt ved $p' = 25$ kPa, hvorefter det ved hjælp af bagtryk på $\Delta u \approx 200$ kPa sikredes at $B > 0,94$.

Da bestemmelsen af K_0 var det primære mål, blev prøverne herefter konsolideret anisotropt med trinvis påførsel af $\Delta \sigma_1$ og tøjningskontrol i de to andre retninger, $\Delta \epsilon_2 = \Delta \epsilon_3 = 0$.

Til slut blev prøven ført udrænet til brud, med måling af poretryk, ved konstant lodret tøjningshastighed $\dot{\epsilon}_1 = 2\% / h$. I de to resterende retninger anvendtes spændingskontrol, $\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3 = 0$ (svarende til slutværdien af de vandrette spændinger i det sidste anisotrope konsolideringstrin), for at efterligne forholdene ved standard triaksialforsøg.

4. FORSØGSRESULTATER

4.1 Klassifikation

Klassifikationsegenskaberne for leren er vist i tabel 2 svarende til tre delprøver for hver prøve.

4.2 Triaksialforsøg

Resultatet af de to triaksialforsøg er sammenstillet i tabel 3. Spændingsvejene i p' , q diagrammet ses i figur 7.

De effektive styrkeparametre angivet i tabel 3 svarer til bedste rette linie, der matcher spændingsvejen hvor der sker tøjningsudmatelse. Benyttes sidste punkt før hastighedsforøgelsen findes " ϕ'_{crit} " = 30,0° for begge forsøg.

Styrkeforøgelsen per dekade ændring af forsøgshastigheden $(\Delta c_u / c_u) / \Delta \log \dot{\epsilon}_1$ er henholdsvis 9,0 og 10,2% for de to forsøg. Dette svarer til den generelle erfaring fra andre lerarter (Steenfelt, 1993).

Tabel 2. Klassifikationsegenskaber

| Prøve nr. | Specific densitet d_s | poretal e | vandindhold w [%] | Plastisitetsindeks I_p [%] | Flydeindeks I_C [%] | Lerindhold L [%] | Aktivitet I_A [%] | Kalkindhold $CaCO_3$ [%] | Reduceret glødetab ¹ gl [%] |
|-----------|----------------------------|----------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|---|
| A | 2,72 | 1,26-1,36 | 46,0-47,8 | 37 | 0,41 | 56 | 0,66 | 16,8 | 5,9 |
| B | 2,72 | 1,40-1,44 | 49,0-53,6 | 37 | 0,39 | 62 | 0,60 | 12,0 | 6,8 |

¹Glødetab reduceret for kalkindhold

Tabel 3. Resultat af triaksialforsøg med $H/D = 1$ og glatte trykhoveder

| Prøve/ forsøg nr. | Konsoliderings- spænding σ'_1 [kPa] | Hviletryks- koefficient σ'_3 / σ'_1 | Udrænet forskyd- ningsstyrke ¹ c_u [kPa] | Styrketilvækst ² Δc_u [kPa] | Effektiv friktionsvinkel ϕ'_{tr} [°] | Effektiv kohæsion c'_{tr} [kPa] |
|-------------------------|--|---|---|---|---|---|
| A/T1 | 80 | 0,67 | 55,2 | 3,9 | 22,7 | 9,5 |
| | 180 | 0,62 | | | | |
| B/T2 | 80 | 0,69 | 48,5 | 3,9 | 24,0 | 9,5 |
| | 147 | 0,62 | | | | |

¹ $\dot{\epsilon}_1 = 2\% / h$ ² $\dot{\epsilon}_1 = 12\% / h$

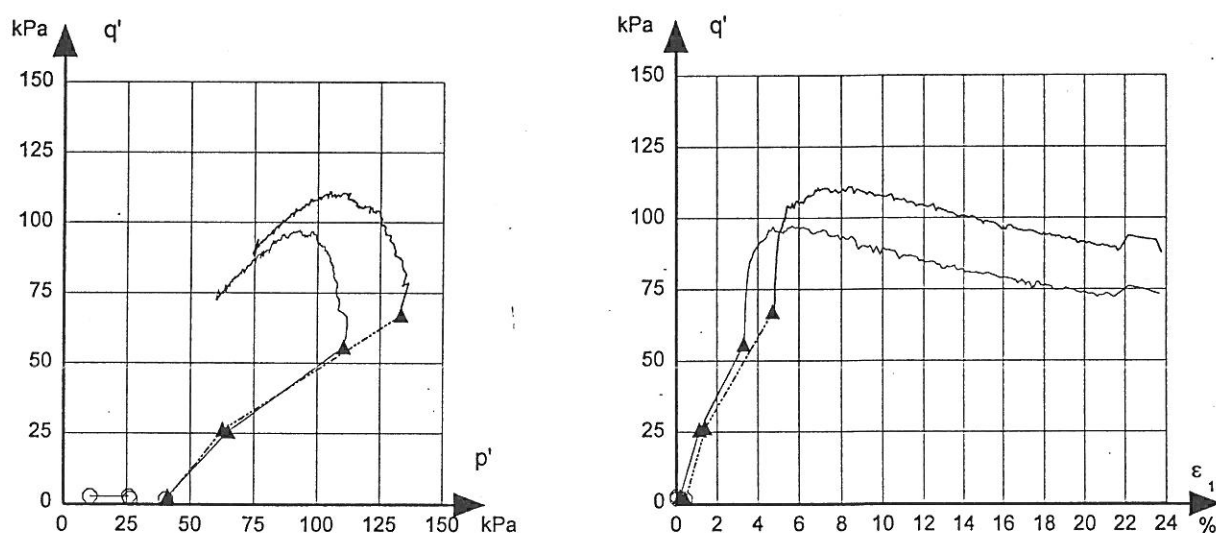


Fig. 7. Spændingsveje for triaksialforsøgene og tilsvarende vertikale tøjninger (tyk streg angiver forsøg T1, mens tynd streg svarer til T2)

4.3 Kubiske forsøg

Resultatet af de kubiske forsøg fremgår af tabel 4. Forsøg K2 og K3 blev ikke kørt til den antagne in situ spænding, da forbelastningsspændingerne blev revideret under forsøgsprogrammet (jvf tabel 1).

Det fremgår tydeligt, at leret er anisotrop med forskellige spændingsforhold i de to vandrette retninger. Når konsolideringsspændingen øges falder spændingsforholdene (K_0 værdierne) og anisotropien udlignes stort set når for-konsolideringsspændingen overskrides.

Figur 8 viser spændingsvariationerne for forsøg K4 i de tre retninger som funktion af de respektive tøjninger.

Endvidere er spændings-tøjningsvariationen i oktaederplanet angivet, hvor

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

og

$$\gamma_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}$$

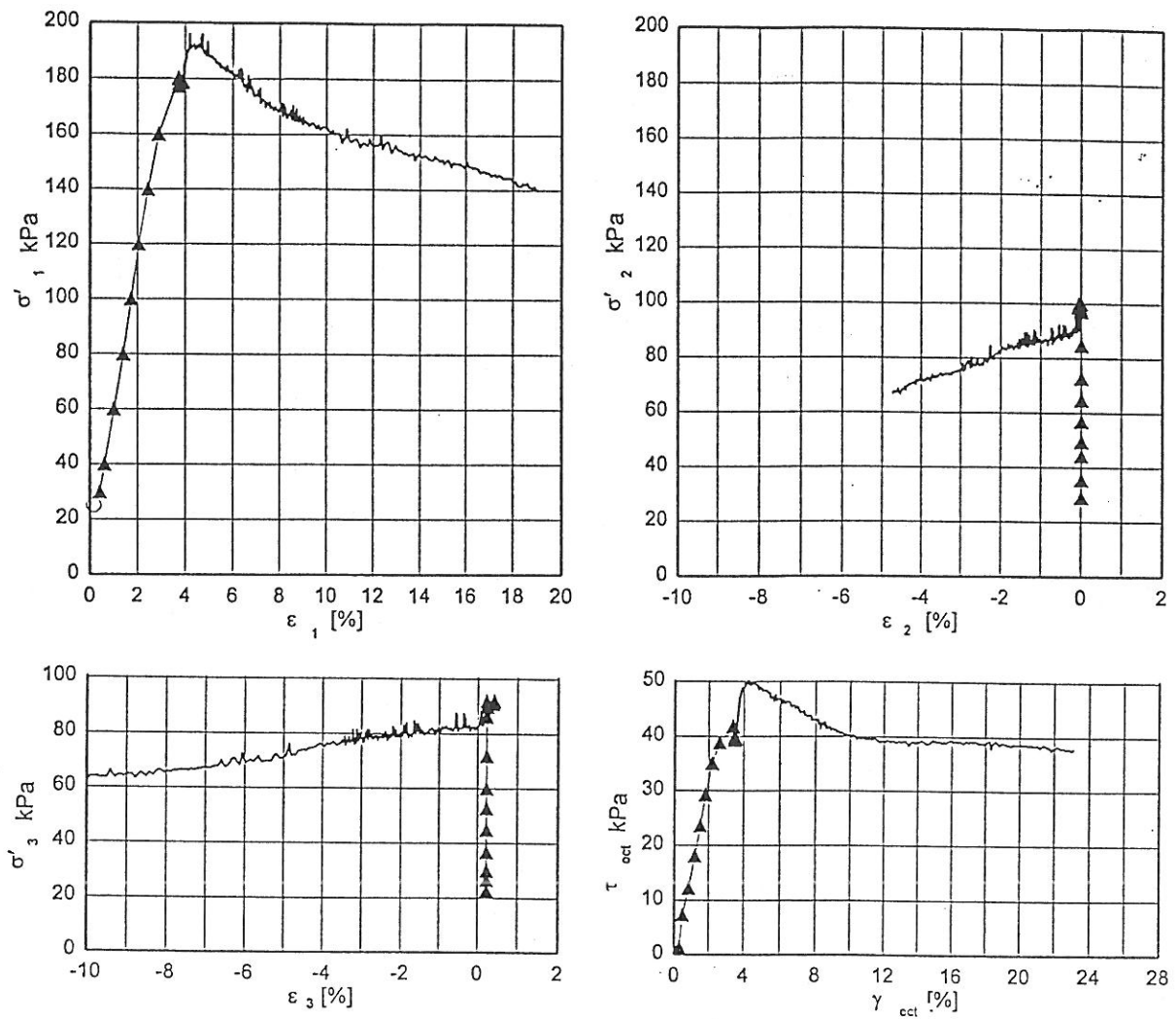


Fig. 8. Arbejdskurver for forsøg K4 i Terningapparatet (Trekanten angiver de arealkonstante konsolideringstrin)

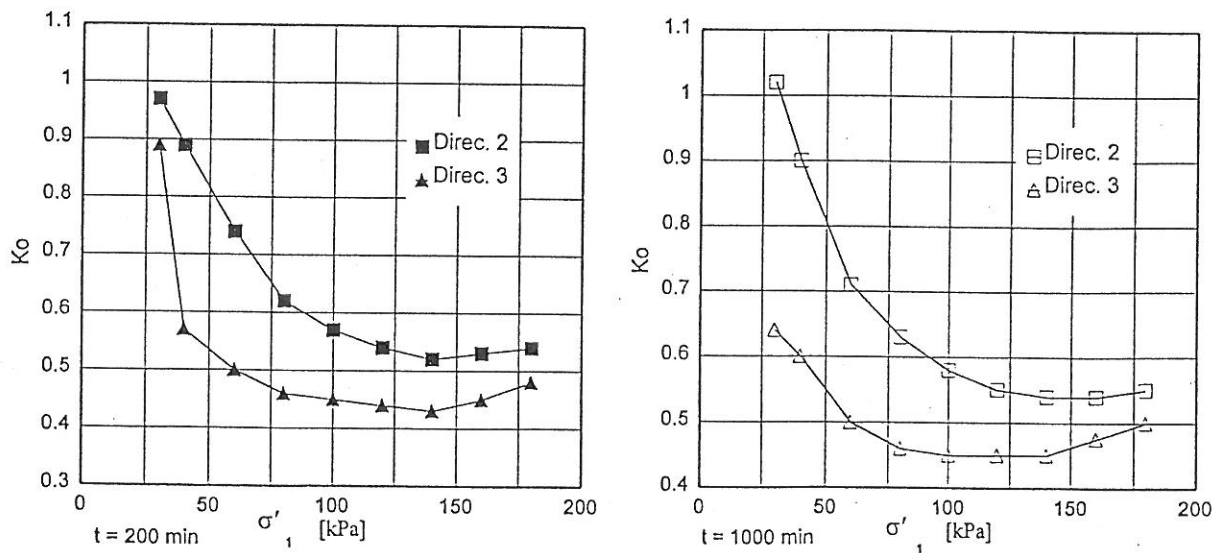


Fig. 9. Spændingsforholdene σ'_2/σ'_1 , σ'_3/σ'_1 som funktion af konsolideringsspenningen σ'_1 for prøve K4

Tabel 4. Resulterende spændingsforhold - K_0 værdier - i kubiske forsøg til tiden $t = 200$ og $t = 1000$ minutter i konsolideringsprocesserne, samt udrænet forskydningsstyrke

| Prøve/ forsøg | σ_1 [kPa] | $t = 200$ minutter | | | | $t = 1000$ minutter | | | brud |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| | | σ_2/σ_1 | σ_3/σ_1 | σ_2/σ_3 | | σ_2/σ_1 | σ_3/σ_1 | σ_2/σ_3 | c_u [kPa] |
| A/K1 | 25 | 0,83 | 0,81 | 1,02 | | | | | |
| | 40 | 0,72 | 0,65 | 1,11 | | 0,72 | 0,66 | 1,09 | |
| | 80 | 0,62 | 0,58 | 1,07 | | 0,63 | 0,57 | 1,11 | |
| | 120 | 0,58 | 0,55 | 1,05 | | 0,57 | 0,56 | 1,03 | |
| | 147 | 0,58 | 0,58 | 1 | | 0,58 | 0,57 | 1,01 | 45,3 |
| A/K2 | 35 | 0,73 | 0,77 | 0,95 | | | | | |
| | 40 | 0,70 | 0,73 | 0,97 | | | | | |
| | 60 | 0,61 | 0,60 | 1,02 | | 0,65 | 0,54 | 1,19 | |
| | 80 | 0,58 | 0,56 | 1,05 | | 0,58 | 0,55 | 1,05 | |
| | 90 | 0,56 | 0,55 | 1,02 | | 0,57 | 0,56 | 1,02 | |
| | 104 | 0,55 | 0,55 | 1 | | 0,55 | 0,55 | 1 | 37,5 |
| B/K3 | 30 | 0,86 | 0,78 | 1,1 | | | | | |
| | 40 | 0,78 | 0,65 | 1,2 | | 0,78 | 0,65 | 1,20 | |
| | 60 | 0,70 | 0,60 | 1,17 | | | | | |
| | 80 | 0,65 | 0,58 | 1,12 | | 0,65 | 0,58 | 1,12 | |
| | 96 | 0,61 | 0,55 | 1,11 | | 0,61 | 0,54 | 1,13 | 36,0 |
| B/K4 | 30 | 0,97 | 0,89 | 1,09 | | 1,02 | 0,64 | 1,59 | |
| | 40 | 0,89 | 0,57 | 1,56 | | 0,9 | 0,60 | 1,50 | |
| | 60 | 0,74 | 0,50 | 1,48 | | 0,71 | 0,50 | 1,42 | |
| | 80 | 0,62 | 0,46 | 1,35 | | 0,63 | 0,46 | 1,37 | |
| | 100 | 0,57 | 0,45 | 1,27 | | 0,58 | 0,45 | 1,29 | |
| | 120 | 0,54 | 0,44 | 1,23 | | 0,55 | 0,45 | 1,22 | |
| | 140 | 0,52 | 0,43 | 1,21 | | 0,54 | 0,45 | 1,20 | |
| | 160 | 0,53 | 0,45 | 1,18 | | 0,54 | 0,48 | 1,14 | |
| | 180 | 0,54 | 0,48 | 1,13 | | 0,55 | 0,50 | 1,10 | 55,0 |

Det ses, at servostyringen virker overbevisende, selv om der styres simultant i alle tre retninger på hhv. tøjningshastighed og spænding. De små udsving på kurverne svarer til grænserne, der er sat i styringsprogrammet. Det er muligt, at dette kan forbedres yderligere ved indlægning af mere sofistikerede, automatiske styringsalgoritmer.

Det fremgår også af figur 8, at udsvingene skal begrænses mest muligt, da der ofte er ganske kort afstand fra K_0 -stien til brudbetingelsen.

Den umiddelbart største forskel mellem de kubiske forsøg og triaksialforsøgene, er de sto-

re forskelle mellem de vandrette tøjninger i de to retninger i *Terningapparatet*. Dette kan af gode grunde ikke observeres i et normalt triaksialforsøg.

5. DISKUSSION AF RESULTATER

Som vist på figur 9, er der for alle forsøg en tendens til, at K_0 værdierne falder for derefter at stige svagt for stigende konsolideringsspen-
ding. Der er ikke fundet nogen forklaring på dette. Fænomenet vil blive undersøgt systematisk ved kommende forsøgsserier.

Ved sammenligning mellem triaksiale og

kubiske forsøg ses det, at K_0 er større ved triaksialforsøgene. Dette illustrerer et af de skismaer man står overfor i praksis.

Hvis K_0 er stor, kan det være tegn på en svag jord ($K_0 \approx 1 - \sin \phi'_{tr}$) eller en stiv jord ($OCR > 1$ og $K_0^* \approx K_0 OCR^{K_0}$). Idet forkonsolideringsspændingen er overskredet i forsøg T1, T2 og K1, K4 kunne forklaringen her være, at en svaghed pga anisotropi umiddelbart kan udløses ved en (svag) ovalisering af triaksprøven, hvilket kræver større kammertryk - og dermed K_0 - for at opretholde konstant tværsnitsareal bedømt ud fra voluminet. I *Terningapparatet* er der mindre frihedsgrad for prøven pga tøjningskontrollen i to retninger ($\Delta \varepsilon_1 = \Delta \varepsilon_2 = 0$).

Sammenlignes derimod den udrænedes forskydningsstyrke findes der god overensstemmelse mellem triaksialforsøg ($H/D = 1$) og kubiske forsøg, som vist i tabel 5. Her er der i brudfasen spændingskontrol i de to sideretninger i det kubiske apparat hvilket giver en større frihedsgrad end tøjningskontrol.

Svarende til vor erfaring vil triaksialforsøg med ru trykhoveder og $H/D = 2$, derimod give styrker på 50 - 100 % af værdien ved $H/D = 1$. Dette bekræftes også af tabel 5.

Tabel 5. Sammenligning af udrænet forskydningsstyrke ved normalkonsoliderede triaksiale og kubiske forsøg

| Prøve/ forsøg | σ'_1 [kPa] | c_u [kPa] | c_u/σ'_1 |
|--------------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| A/T1 | 178,1 | 55,2 | 0,31 |
| B/T2 | 147,6 | 48,5 | 0,33 |
| A/K1 | 147 | 45,3 | 0,31 |
| B/K4 | 180 | 55,0 | 0,31 |
| ($H/D=2$) ¹ | | | 0,24 |
| ($H/D=2$) ¹ | | | 0,29 |

¹Værdier fra tabel 1

6. PERSPEKTIV OG KONKLUSION

6.1 *Terningapparatet, Mark II*

Ved hjælp af en bevilling fra Statens Teknisk

Videnskabelige Forskningsråd er der i 1996 skabt mulighed for en gennemgribende renovering af *Terningapparatet*, så det både mekanisk og elektronisk forbliver *state-of-the-art*, men samtidigt også nemmere at betjene. Det giver mulighed for at løse en række opgaver

- Gennem forskningsprojekter og kommercielle opgaver udføres forsøg til verifikation og opbygning af materialemodeller for jord, så vi kan drage nytte af udbudet af FEM-pakker til design af konstruktioner hvor jord indgår som materiale.
- I *Terningapparatet* er det muligt at køre "trækforsøg" uden de problemer med necking man oplever i de traditionelle triaksialapparater. Herved kan et bedre skøn for udmattelsesstyrken ved cyklisk belastning findes uden de sædvanlige begrænsninger.
- Forsøg til bestemmelse af "plane" parametre for sand, ler, beton etc kan direkte udføres.
- Forsøg kan udføres med ønskede spændings- eller tøjningsstier svarende til in situ observationer.

6.2 Begrænsninger

Styrken i *Terningapparatet*, at alle seks trykhoveder er glatte, er samtidig også en begrænsning. Det betyder, at der kun kan køres forsøg svarende til variation af hovedspændingerne. I naturen roterer hovedspændingsretningerne når vi kigger på generelle lastsituationer. For at studere virkningen af dette må man ty til skærebokslignende apparater eller fuldskalafor-søg.

Da Geoteknikgruppen samtidig har en række af disse apparater til rådighed, er det muligt at kombinere forsøg på en sådan måde, at alle relevante spændingstilstande kan undersøges.

6.3 Konklusion

Gennem en to-faset renovering og ombygning er *Terningapparatet* gjort operationelt og har vist sin værdi ved en kommerciel opgave.

Med *Terningapparatet, Mark 2* vil Geoteknikgruppen ved AAU være rustet til at møde de forsøgsmæssige udfordringer den geotekniske profession stiller til elementforsøg i det 21. århundrede.

REFERENCER

Berre, T., Foged, N., Amar, S., Silvestri, F. (1995). Methods for triaxial compression tests on water-saturated soils. *Standardisation of laboratory testing. Workshop 2 - XI ECSMFE 95*, Copenhagen pp. 27 - 44.

Ibsen L.B (1994). The stable state in cyclic tri-

axial testing on sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 13, pp 63-72.

Jacobsen, H.M. (1981). Two comments on laboratory tests. *Proc. X Int. Conf. Soil Mech & Fndn. Eng.*, Stockholm, Vol IV, pp 665-666.

Lade, P.V. (1982). Localization effects in triaxial test on sand. *IUATM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials*, A.A. Balkema, Rotterdam.

Steenfelt, J.S. (1993). Sliding resistance for foundations on clay till. *Wroth Memorial Symposium, Oxford, Predictive soil mechanics*. Thomas Telford, London, pp 664-684.